

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740145

研究課題名（和文） スーパーカミオカンデ検出器を用いたニュートリノ振動パラメータ θ_{13} の測定研究課題名（英文） Measurement of the neutrino oscillation parameter, θ_{13} , by the Super-Kamiokande detector

研究代表者

梶 裕志 (KAJI HIROSHI)

東京大学・宇宙線研究所・特任研究員

研究者番号：80444397

研究成果の概要（和文）：未測定であったニュートリノ振動パラメータ θ_{13} の測定を行った。これは J-PARC ニュートリノビームを 295km 離れたスーパーカミオカンデ検出器で測定する T2K 実験の一部である。本研究はそのうちスーパーカミオカンデデータの解析を担当し、ビームサンプル中に 6 事象の電子型ニュートリノ事象を観測した。これはニュートリノ振動パラメータに $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ (90%C.L.) という制限を与え、 θ_{13} に有限値を与えた世界で初めての結果である。

研究成果の概要（英文）：The neutrino oscillation parameter, θ_{13} , which has still been unknown, is measured by the T2K experiment. The J-PARC neutrino beam is observed at Super-Kamiokande after 295km flight. This project takes charge of the analysis of Super-Kamiokande data from whole T2K activities. The 6 electron-like neutrinos are observed in the J-PARC neutrino beam sample. The resultant oscillation parameter is $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ (90%C.L.). This is the first result to give the finite value of θ_{13} .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
年度			
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,200,000	360,000	1560,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ニュートリノ、ニュートリノ振動

1 研究開始当初の背景

ニュートリノ（以下 ν ）振動の研究はスーパーカミオカンデ (SK) 実験が大気 ν フラックスに欠損を観測したことに始まる。同実験は ν 振動現象を測定し、「 ν が質量を持つ」ことを証明した。 ν 振動現象は ν の「3 つのフレーバー固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ)」と「3 つの質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3)」を以下の様に関連付けることにより説明でき

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix},$$

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} u_{e1} & u_{e2} & u_{e3} \\ u_{\mu 1} & u_{\mu 2} & u_{\mu 3} \\ u_{\tau 1} & u_{\tau 2} & u_{\tau 3} \end{pmatrix},$$

式中の 3×3 行列 U_{PMNS} のことを Pontecorvo・牧・中川・坂田行列 U_{PMNS} と呼ぶ。つまり ν 振動が起こることは「 ν が質量を持つ」ことの間接的な証拠となる。

U_{PMNS} 行列の要素 $u_{\alpha\beta}$ は 3 つの混合角 ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) と CP パラメータ δ_{CP} により記述される。それに 2 つの ν 質量二乗の差 ($\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$) を加えた 6 つのパラメータが ν 振動の振る舞いを説明する。これらのパラメータは ν 振動現象の測定結果（実験結果）によってのみ決定される。研究開始当初において 4 つのパラメータには有限値が得られており、残る未測定パラメータは θ_{13} と CP パラメータの δ_{CP} であった。

ν 振動実験における次の研究課題は θ_{13} 測定であった。 δ_{CP} は「 ν 振動における CP 対称性の破れ」を表し、最も注目されているパラメータである。しかしその効果は小さく、振動式において θ_{13} を係数とする項に現れるため、 δ_{CP} 測定にはまず θ_{13} の有限値が必要である。この θ_{13} 測定には「加速器で生成されたミューオン型ニュートリノ (ν_μ) の電子型ニュートリノ (ν_e) への振動」を検出する方法と「原子炉で生成された ν_e 反粒子の欠損」を測定する方法がある。これら方法による実験が世界中で提案・準備されており、 θ_{13} 測定は厳しい競争状態にあった。

2 研究の目的

本研究は素粒子物理学としての ν の研究であるとともに、宇宙創成の謎に迫る研究でもある。 ν 振動パラメータのうちの θ_{13} を測定することが具体的な目標であり、「これは素粒子 ν の性質を理解する」という興

味に基づくものである。一方で、前述の通り θ_{13} の測定は「 ν 振動による CP 対称性の破れ」の測定に必要な不可欠な準備であり、宇宙物理学的な興味も満たす研究である。

CP 対称性の破れについてもう少し述べるならば、これは現在の物質優勢の宇宙を創成する上で必要な現象である。この起源として「クォークの世代間混合」を提唱したのが小林・益川理論である。この理論は「第 3 世代クォークの予言」など素粒子標準理論の構築に大きな貢献をし、また B ファクトリー実験によりその正しさが証明された。小林・益川両氏がこの業績によりノーベル物理学賞を受賞したのは記憶に新しいところである。一方で、現在の宇宙を説明するには、同理論に基づく CP 対称性の破れだけでは「破れの度合い」が不十分だとわかってきた。そのため新たな CP 対称性の破れの測定は、現在世界中で最も注目されている研究対象の 1 つである。

3 研究の方法

本研究は、T2K 実験の枠組みの中で、前節で述べられた「 ν_μ から ν_e への振動」を検出することで θ_{13} 値を測定するものである。この ν 振動確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ は以下の式で表され

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{13}^2 L}{E} \right)$$

θ_{13} の関数となる。ここで L, E はそれぞれ ν の飛行距離とエネルギーを単位「km」「GeV」で表したものである。その他の振動パラメータについては過去の実験結果より $\sin^2 \theta_{23} \sim 0.5$, $\Delta m_{23}^2 = 2.0 - 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ であることが分かっている。



図 1: T2K 実験全体像: ν ビームは茨城県東海村 J-PARC の ν ビームラインで生成され、岐阜県飛騨市の東京大学神岡施設へ照射される。振動後の ν フラックスは同施設の SK 検出器にて測定される。

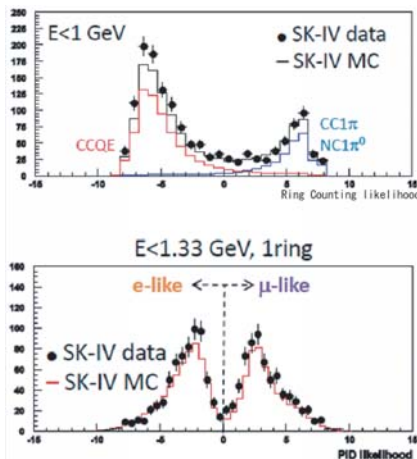


図2: Ring Counting likelihood(上)と Particle ID likelihood(下) 分布: 大気 ν 289 日観測データと MC simulation を重ねて表示している。Ring Counting likelihood は 1ring(< 0) と 2ring 以上 (> 0) の事象をこの分布から選別する。Particle ID likelihood はだけを選んだ分布。同じく e -like ring(< 0) と μ -like ring(> 0) を選別する。

図1はT2K実験の全体像を示している。T2K実験はJ-PARCで生成された ν_μ ビームを295km離れたSK検出器で観測する実験で、「ビームライン」「前置検出器」「T2K-SK」「 ν 散乱断面積スタディ」の4つのサブグループからなる。 ν 振動の解析は、各サブグループが出した結果を統合して行われる。

研究代表者は、T2K実験で「 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動」の測定を実現するため、T2K-SKグループの課題に取り組んだ。T2K-SKグループは後置検出器であるSK検出器を維持運転し、振動後の ν フラックスを測定するグループである。この報告書ではその活動のうち「(1)T2Kに向けたSK検出器のセットアップと検出器の維持・運転」「(2)T2Kデータの選別」について、学術雑誌へ発表した論文には載せられなかった細部を含めて述べる。

(1) SK 検出器セットアップと維持・運転

まず必要だったのは、SK 検出器の測定事象に対し「 ν_μ/ν_e どちらか?」「どの種類の ν 散乱だったか?」などを判定する事象再構成プログラムの整備である。事象再構成には膨大な情報量の整理が必要であり、大気 ν サンプル用の事象再構成プログラム (APFIT) を使い、計算サーバー上ですべて自動的にやっている。SK 検出器は 11000 本の光電子増倍管 (PMT) からの信号

を高いレート ($>10\text{Hz}$) で保存しており、これを 1 つ 1 つ人間の手で整理し事象再構成するのは不可能である。APFIT プログラムはもともと SK 実験の大気 ν データを解析するために作られたが、同時期に行われている T2K 実験でも用いられている。以下に APFIT が行う事象再構成処理の流れを示す。

APFIT の流れ:

- Afit
各 PMT の信号タイミングから Time of Flight 法で ν 散乱点を同定する。
- Ring Counting
PMT 信号の 2 次元マップから事象中に荷電粒子が作った Cherenkov ring がいくつあるかを同定する。弾性散乱のときは ring が 1 つ、非弾性散乱の時は 2 つ以上になる。
- Particle ID
各 ring が「 e/μ どちらにより作られたか?」を判定する。信号量最大 ring に対するこの結果が「 ν_μ/ν_e どちらの散乱だったか?」を決める。
- MS fit
PMT 信号の 2 次元マップ中の信号量最大 ring の分布から、 ν 散乱点を再決定する。タイミングを使った方法より位置決定精度が高い。
- decay- e search
 ν 散乱で生成した μ 粒子が崩壊して生成した e を探索する。この崩壊 e の有無も ν_μ の散乱であることを決定する大事な情報になる。
- 運動量再構成
各 ring を作った粒子の運動量をそれぞれ同定する。

作業はまず既存の APFIT プログラムを新しいデータフォーマットに対応させることから始められた。SK 検出器は 2008 年 9 月に光電子増倍管の信号をデジタル化する読みだし回路を一新した。それに伴いディスクに保存される ν 事象データのフォーマットも変更を余儀なくされた。そのためプログラムを改良し、計算サーバー上での「コンパイル・リンク」「正常に動作」をチェックするという泥臭い作業から始められた。

そのうえで APFIT プログラム内のパラメータのチューニングを行った。SK 検出器のレスポンスは上述の

読み出し回路のアップグレードにより変化していた。また水チェレンコフ検出器は純水の純度や温度でもレスポンスを変化させる。APFIT 内パラメータをこれらの変化に合わせてチューニングすることで、事象再構成の高い性能を維持することができた。例えば図 2 は Ring Counting と Particle ID の性能を大気 ν サンプルで見た分布である。チューニング後の 1ring サンプルの検出効率は 90%、 e -ring/ μ -ring それぞれの検出効率は 99% を達成した。

実験中、SK 検出器の状態が良好に保たれていることは、同時期に測定された大気 ν データをチェックすることで確認された。図 2 中の Monte Carlo(MC) シミュレーションサンプルの分布は測定データの分布をよく再現できており、検出器の振る舞いは十分に理解できている。データ分布と MC 分布の間にある「僅かな差」を SK 検出器に起因する不確定要素と定義し、それが ν 事象検出効率に与える影響は SK 検出器の系統誤差として見積もられている。例えば T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の解析は ν_e Charged Current(CC) Quasi-Elastic(QE) 散乱事象を信号事象として観測するが、その信号検出効率に対する系統誤差は 5.1% である。同じく背景事象の混入率に対する系統誤差も 12.4% と見積もられている。

(2) T2K データの選別

大気や太陽から生成される ν を測定する SK 実験と J-PARC ν ビームを測定する T2K 実験は、どちらも SK 検出器を用いている。そのため J-PARC ν ビームの到来タイミング付近 5 マイクロ秒間に観測された事象を T2K データ、その他の時間に観測された事象を SK データとするタイムシェアリングにより、両実験の ν 事象観測を実現している。

J-PARC, 東京大学神岡施設どちらも GPS と同期した時計を持っており、この時計を基に「 ν ビームの照射タイミング」に「 ν の飛行時間」を足したものを「SK への ν の到来タイミング」とした。 ν 到来タイミングの正しさは、測定事象のタイミング分布中に J-PARC 陽子ビームのバンチ構造を観測することで確かめられている。図 3 にそのタイミング分布を載せる。このバンチ構造の測定により、T2K 実験における ν 到来タイミングの精度は 100 マイクロ秒と見積もられている。

T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動解析では、 ν_e による CC QE 散乱を信号事象として SK 検出器で測定する。このためには APFIT により「 e の ring が 1 つ」の事象を選ぶことが

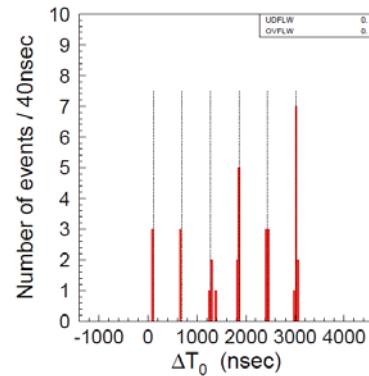


図 3: 事象測定時間と ν ビームタイミングの差 ΔT_0 : 測定された ν 事象はバンチタイミング上に分布している。このデータは 2009 年に取得された T2K 実験最初のランで取得されたデータである。このとき J-PARC メインリングは 1spill あたり 6 バンチで運転していた。

効果的であるが、よりフェイク事象の混入率を小さくするため、さらにいくつかの選別条件を課したファイナルサンプルを作った。表 1 は事象選別条件とその各段階での信号事象の検出効率を表にまとめたものである。ここには主な背景事象である Neutral Current(NC) 事象の混入数をまとめる。

図 4 はこの選別条件最初の ν_e CC QE 散乱事象についてその PMT 信号の 2 次元マップを見たものである。SK 検出器の円柱状の側壁に散乱 e が生成した Cherenkov ring が測定されている。

表 1: T2K ν_e CC QE 事象の選別条件まとめ:各選別条件の段階で信号事象の検出効率と NC 事象このとき NC 背景事象は実際に解析をしたデータの統計 (1.43×10^{20} POT) を仮定し見積もった。

	信号検出効率	NC 事象数
Fully Contained	96.8%	18.3
1ring	83.9%	5.7
e -like	83.2%	3.7
e 運動量 > 100 MeV	82.2%	3.2
μ 崩壊 e なし	74.2%	2.8
π^0 カット	67.7%	0.8
$E_\nu < 1250$ MeV	66.1%	0.6

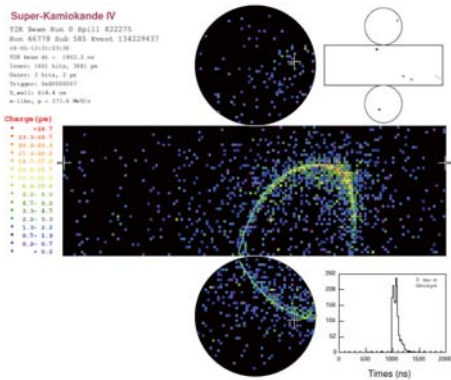


図 4: T2K ν_e CC QE 事象の PMT 信号の 2 次元マップ: 散乱電子が生成した Cherenkov ring がマップ上に見える。典型的な e -like 1ring 事象である。

4 研究成果 T2K 実験は 1.43×10^{20} POT のデータを解析し、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の測定を行った。これは 2009 年 1 月-2011 年 3 月間の J-PARC ν ビーム運転により取得されたデータである。この期間に取得した SK 検出器データを解析した結果、6 事象の ν_e CC QE 事象を観測した。背景事象の混入量は 1.5 ± 0.3 事象と MC シミュレーションにより見積もられており、これは優れた $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の信号である。この時、J-PARC ν ビームにもともと含まれている ν_e 事象は背景事象と定義し、上述の背景事象数に足されている。

またファイナルサンプルを用いて ν エネルギー分布を作り、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動から期待されるエネルギー分布と比較した (図 5)。測定事象は 6 事象しかなく、その

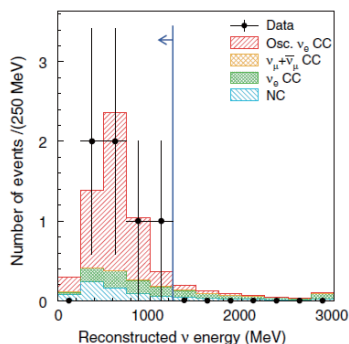


図 5: T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 解析のファイナルサンプルの ν エネルギー分布: データの分布 (黒ポイント) は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の効果 (赤ヒストグラム) で説明することができる。

統計誤差は大きい、測定事象の分布は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の効果と矛盾しない。

T2K 実験の $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動解析は以上の結果に、ビームライングループが求めた「SK 検出器/前置検出器の ν フラックス比」「前置検出器が測定した ν 振動前のフラックス分布」「SK 検出器、前置検出器における ν 散乱断面積とその誤差」を総合して行われる。図 6 は T2K 実験が発表した $\sin^2 2\theta_{13}$ と δ_{CP} に対する Allowed region である。 δ_{CP} に制限を与えることはできなかったが、 $\sin^2 2\theta_{13}$ に対して 90% 信頼度でゼロを棄却した。T2K 実験は世界で初めて $\sin^2 2\theta_{13}$ へ有限値を与えたことになる。 $\delta_{CP} = 0$ を仮定したとき、90% 信頼度で許される θ_{13} パラメータの範囲は $\Delta m_{23} > 0$ ($\Delta m_{23} < 0$) という条件のもと $0.03(0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34)$ である。2 つの解が許されるのは SK 検出器が ν と反 ν を区別できないことに起因する。物質中での ν 振動において θ_{13} と δ_{CP} の効果は $\Delta m_{23} > 0$ では ν に $\Delta m_{23} < 0$ では反 ν に現れるが、SK 検出器はこれらを区別できない。

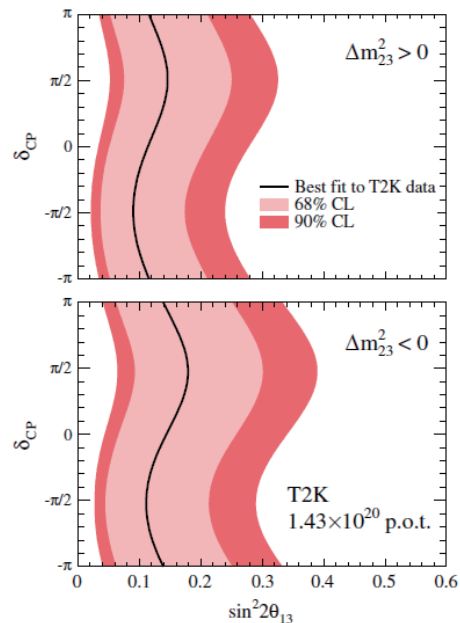


図 6: ν 振動パラメータ $\sin^2 2\theta_{13}$ と δ_{CP} の allowed region: 全 δ_{CP} 領域に対して、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0$ を棄却できている。 $\Delta m_{23} > 0$ (上) と $\Delta m_{23} < 0$ (下) で許されるパラメータ領域が僅かに異なる。

5 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件) ※すべて査読あり

① “First muon-neutrino disappearance study with an off-axis beam”,
K. Abe, H. Kaji(159 番目), *et al*(442 名),
Phys. Rev. D **85**, 031103 (2012)
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.031103

② “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam”,
K. Abe, H. Kaji(137 番目), *et al*(349 名),
Phys. Rev. Lett. **107**, 041801 (2011).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.041801

③ “The T2K experiments”,
K. Abe, H. Kaji(204 番目), *et al*(505 名),
Nucl. Instrum. Meth. A **659**, 106-135 (2011)
DOI: 10.1016/j.nima.2011.06.067

[学会発表] (計 2 件)

① “Recent results from atmospheric neutrino analysis at Super-Kamiokande”
Hiroshi Kaji,
12th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams
(2010 年 10 月 21 日、TIFR Mumbai)

② “Super-Kamiokande IV: 中、高エネルギー領域ニュートリノの事象再構成について”,
梶裕志,
日本物理学会春季大会
(2010 年 3 月 22 日、岡山大学)

[その他]

ホームページ等

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/whatsnew/new-20110615.html>

6 研究組織

(1) 研究代表者

梶 裕志 (KAJI HIROSHI)

東京大学・宇宙線研究所・特任研究員

研究者番号：80444397

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：